

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902834

基于 GST-TT 变换的单端故障行波测距方法*

徐耀松¹ 徐才宝¹ 唐 维¹ 徐 胜²

(1. 辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院 葫芦岛 125105;

2. 国网辽宁省电力有限公司葫芦岛供电公司 葫芦岛 125105)

摘要:针对行波法测距波头时刻标定精度不足和波速不稳定的问题,提出一种基于 GST-TT 变换的单端故障行波测距方法。首先将采样的电压行波信号做解耦处理,提取线模电压信号,然后将线模电压信号进行广义 S 变换,提取适当高频频带作为故障特征频带,运用 TT 变换对角线位置元素聚高频、抑制低频的特性,在故障特征频带内对波头到达测量端时刻进行精确标定,根据不依赖具体行波波速的故障测距计算方法得出故障距离。该方法可以提高波头时刻的标定精度,降低波速不稳定对故障测距的影响。通过 PSCAD 仿真验证,根据结果可知,该方法测距精度较高,在无噪声干扰情况下,平均相对误差为 0.25%;同时也可知晓该方法具有较强的耐受过渡电阻能力和抗噪能力。

关键词: 高压直流;广义 S 变换;TT 变换;波头时刻标定;故障测距

中图分类号: TN98;TM935 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Single-ended fault traveling wave ranging method based on GST-TT transform

Xu Yaosong¹ Xu Caibao¹ Tang Wei¹ Xu Sheng²

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Huludao Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Company, Huludao 125105, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient accuracy of wave head time calibration and unstable wave velocity in traveling wave method, a single-ended fault traveling wave ranging method based on GST-TT transform is proposed. Firstly, the sampled voltage traveling wave signal is decoupled to extract the line mode voltage signal; Secondly, the line mode voltage signal is S-transformed in general; Thirdly, the appropriate high-frequency band is extracted as the fault characteristic band; Fourthly, Using high-frequency aggregation and low-frequency suppression characteristics of TT transform's diagonal position elements, the arrival time of the wave head at the measuring end is accurately calibrated in the fault characteristic band; Lastly, the fault distance is obtained based on the fault ranging calculation method which does not depend on the specific traveling wave velocity. The method can improve the calibration accuracy of the wave head time and reduce the influence of the wave speed instability on the fault location. The PSCAD simulation proves that the method has high accuracy and the average relative error is 0.25% in the absence of noise interference. It also has strong tolerance to transition resistance and anti-noise ability.

Keywords: HVDC; GST; TT transform; wave head calibration; fault location

0 引言

高压直流输电方式比高压交流输电方式具有输电距离更远、输电容量更大以及输电线路成本更低的优势。

但是,当高压直流输电系统发生金属性接地短路故障时,故障电流蹿升速度更快,对继电保护的要求更高。这也给在更短的继电保护时间内,精确快速的检测出故障点带来了挑战。

现阶段国内外学者对直流故障测距已经做了大量的

研究^[1-3]。基于离线的测距方法通过向故障线路注入信号^[4-5],以此来检测故障距离,该方法不能完全模拟出故障特征,同时可能损坏输电设备。故而,在线测距方法成为了故障测距的主要方法。在线测距方法包括故障分析法和行波法。故障分析法^[6-9]分析故障电压和电流的特征计算出故障距离,测距精度较高。当前人工智能飞速发展,有学者将神经网络应用到了故障测距中^[10-12],对采样频率要求低,鲁棒性高,但所需训练样本数据量大,对于不同输电线路适应性差。行波法主要涉及波头识别、波头到达测量端时刻的标定和波速的确定。双端行波测距法^[13-15]测距精度高,是实际工程中的主要测距方法,但对时技术要求高,时间同步误差要求小于 $1.0 \mu\text{s}$ 。单端行波法测距精度较高,没有时间同步的要求,但对故障行波波头的识别要求较高。因此,部分学者就通过提高波头的识别精度来提高测距精度^[16-18]。无论是双端测距还是单端测距,都需要计算某一频率点的波速或者根据经验波速进行故障距离的计算,但行波的色散会导致波速衰减。因此,有人提出基于多测点装设 Rogowski 线圈的方法^[19]来提高波头的识别精度和波头时刻标定精度,同时降低波速衰减对故障测距的影响,该方法在实际工程中已有应用,但是需要在每个杆塔上安装传感器,成本较高。

为了提高行波波头时刻标定精度以及降低波速衰减对故障测距带来的影响,本文提出基于 GST-TT 变换的单端故障行波测距方法。将故障线模电压信号进行广义 S 变换 (generalized S transform, GST),利用 GST 良好的时频分辨特性,提取适当的频带作为故障特征频带;再将故障特征频带分量进行 TT (time time) 变换,利用 TT 变换精确标定故障行波波头到达测量端的时刻,根据不依赖具体行波波速的方法,计算出故障距离。在 PSCAD 平台上搭建 $\pm 500 \text{ kV}$ 双极超高压直流输电系统模型,通过仿真,利用 MATLAB 进行数据处理,结果表明本文方法测距精度较高。

1 直流系统故障行波分析和故障距离计算方法

1.1 直流系统故障行波分析

本文以 $\pm 500 \text{ kV}$ 的超高压双极直流输电系统为例进行仿真验证,采用相域频率相关模型,模型参考文献^[20],采用架空线路进行输电,拓扑图如图 1 所示。图中 1~9 分别是交流系统、交流滤波器、交流侧母线、换流变压器、换流器、平波电抗器、直流滤波器、直流母线和接地极线路。

双极直流输电系统发生区内单极接地短路故障时,系统正负极母线之间存在耦合,因此,必须通过解耦处

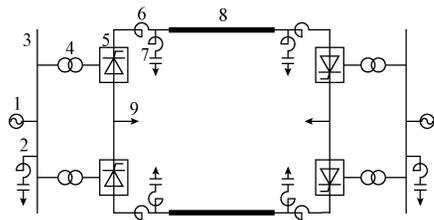


图 1 $\pm 500 \text{ kV}$ 超高压双极直流输电系统拓扑

Fig. 1 Topology diagram of $\pm 500 \text{ kV}$ UHV bipolar DC transmission system

理,分离非故障极母线的电磁干扰,降低干扰信号对故障测距的影响。本文采取 Karenbauer 相模变换解耦:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_0(t) \\ \mathbf{u}_1(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_+(t) \\ \mathbf{u}_-(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & -\mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_+(t) \\ \mathbf{u}_-(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_+(t)$ 为正极电压; $\mathbf{u}_-(t)$ 为负极电压; $\mathbf{u}_0(t)$ 为零模电压; $\mathbf{u}_1(t)$ 为线模电压。

当发生金属性单极接地短路故障时,故障行波每经过故障点会发生反射和折射;同时,直流输电线路两端由于换流器的作用,即存在物理边界,使故障行波在两端近似发生全反射。

1.2 单端行波故障计算方法

本文采用不依赖波速的故障距离计算方法^[21],即认为故障行波波速 v 任意的,且不变。当直流母线发生金属性单极接地故障时,只需要测量出故障行波波头第一次到达测量端的时间 t_1 ,故障行波经过反射后第一次到达测量端的时刻 t_2 以及对端母线反射行波第一次到达测量端的时刻 t_3 ,就可以计算出故障点到测量端的距离。设故障点到测量端的距离为 d ,架空线路全长为 L ,故障发生的绝对时刻为 t_0 ,对故障距离 d 有如下推导。

对故障行波波头第一次到达测量端有:

$$v(t_1 - t_0) = d \quad (2)$$

对故障行波经过反射后第一次到达测量端有:

$$v(t_2 - t_0) = 3d \quad (3)$$

对对端故障行波第 1 次到达测量端有:

$$v(t_3 - t_0) = 2L - d \quad (4)$$

联立式(2)~(4),得到唯一解:

$$d = \frac{(t_2 - t_1)L}{(t_2 + t_3 - 2t_1)} \quad (5)$$

2 广义 S 变换和 TT 变换基本理论

S 变换是一种有着良好性能的时频分析方法^[22]。它的时窗是高斯窗函数,窗宽与频率之间存在关联。

函数 $x(t)$ 的连续 S 变换的定义为:

$$S(\tau, f) = \int_{+\infty}^{-\infty} x(t) \omega(t - \tau, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

其中:

$$\omega(t - \tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(t-\tau)^2}{2a^2}} \quad (7)$$

式中: t 是时间; τ 是 高 斯 窗 口 中 心, 用 于 控 制 高 斯 窗 在 时 间 轴 上 平 移; f 是 频 率。

S 变 换 具 有 较 好 的 时 频 分 辨 率, 但 信 号 频 率 越 高, 频 率 混 叠 越 严 重, 严 重 影 响 对 高 频 信 号 分 量 的 识 别 和 信 号 各 频 带 分 量 的 准 确 提 取。为 了 解 决 这 个 问 题, 在 S 变 换 中 引 入 调 节 因 子 a 和 $b(a, b > 0)$, 得 到 GST, 定 义 为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f^b|}{a\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^{2b}(t-\tau)^2}{2a^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

GST 与 S 变 换 的 区 别 仅 在 于 在 窗 函 数 $\omega(t - \tau, f)$ 中 引 入 调 节 因 子 a 和 b , 将 高 斯 窗 函 数 的 标 准 差 $1/f$ 由 变 成 了 a/f^b 。增 加 a 的 值 或 者 降 低 b 的 值, 高 斯 窗 的 宽 度 在 时 域 内 被 拉 伸, 同 时 在 频 域 内 被 压 缩。基 于 此 来 提 高 信 号 各 频 带 分 量 的 提 取 精 度, 利 于 对 各 频 带 内 波 头 的 识 别。

TT 变 换 可 以 根 据 S 变 换 推 导 而 来, 但 为 便 于 TT 变 换 对 角 线 位 置 元 素 的 分 析, 由 快 速 算 法 直 接 给 出, 如 式 (9) 所 示。

$$TT(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f^b|}{a\sqrt{2\pi}} x(\theta) e^{-\frac{f^{2b}(\theta-\tau)^2}{2a^2}} e^{-j2\pi f(\theta-t)} d\theta df \quad (9)$$

对 连 续 信 号 $x(\theta)$ 交 换 积 分 顺 序 得:

$$TT(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta) g_a(\theta - t, \theta - \tau) d\theta \quad (10)$$

其中:

$$g_a(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f^b|}{a\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^{2b}t^2}{2a^2}} e^{-j2\pi ft} df \quad (11)$$

为 方 便 计 算 以 进 行 分 析, 令 $b = 1$ 时, 通 过 积 分 运 算 可 得:

$$g_a(t, \tau) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{a}{\tau^2} - 2\pi a^2 \frac{t}{\tau^3} e^{-\frac{2\pi^2 a^2 t^2}{\tau^2}} \text{Erfri}\left(\sqrt{2} a \pi \frac{t}{\tau}\right), \forall \tau \neq 0 \\ -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{a^2}, \tau = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, Erfri 为 误 差 方 程。令 $x = \frac{t}{\tau}$, 定 义:

$$p_a(x) = a \sqrt{\frac{2}{\pi}} - 2\pi a^2 x e^{-2(\pi a x)^2} \text{Erfri}(\sqrt{2} a \pi x) \quad (13)$$

则 有:

$$g_a(t, \tau) = \frac{1}{\tau^2} p_a(x), \forall \tau \neq 0 \quad (14)$$

当 $x = 1$ 时, 即 TT 变 换 谱 的 对 角 线 位 置 有:

$$TT(t, \tau) = F^{-1}\{X(f)P(f)\} \quad (15)$$

由 积 分 变 换 式 得:

$$P(f) = F\{g(t, t) = -2p_a(1)\pi^2 |f|\} \quad (16)$$

式 中: $F\{\cdot\}$ 为 傅 里 叶 变 换; $F^{-1}\{\cdot\}$ 为 傅 里 叶 反 变 换; X 代 表 信 号 x 的 傅 里 叶 变 换; P 代 表 对 角 线 元 素 p 的 傅 里 叶 变 换。

式 (16) 表 明, 在 信 号 $x(t)$ 所 对 应 的 频 带 内, $P(f)$ 和 $|f|$ 是 成 正 比 例 的, 在 对 角 单 元 位 置 附 近, 信 号 的 高 频 成 分 的 幅 值 比 低 频 成 分 的 幅 值 要 更 高。

为 了 验 证 GST 的 时 频 分 辨 特 性 和 TT 变 换 对 角 线 元 素 的 特 性, 采 用 如 图 2 所 示 合 成 信 号, 由 10、50 和 100 Hz 的 3 个 余 弦 函 数 组 成, 在 10 的 低 频 信 号 上 叠 加 100 Hz 的 高 频 信 号 成 分 的 测 试 信 号 进 行 测 试。

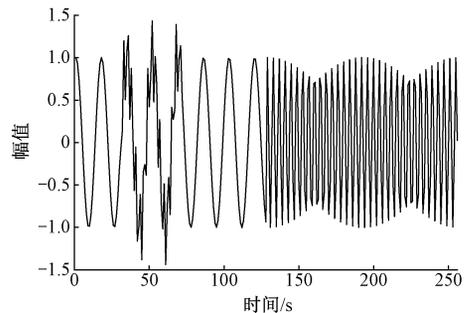


图 2 合成信号
Fig. 2 Synthetic signal

对 合 成 信 号 做 GST, 当 $a = b = 1$ 时, 合 成 信 号 时 频 图 如 图 3 所 示, 从 图 3 可 以 得 出, GST 具 有 优 秀 的 时 频 分 辨 率, 可 以 把 不 同 频 率 成 分 的 信 号 一 一 区 分 开 来。因 此, 在 处 理 故 障 行 波 信 号 的 过 程 中, 利 用 GST, 可 以 将 故 障 行 波 信 号 的 不 同 频 率 成 分 分 开, 以 便 于 对 故 障 特 征 频 带 的 提 取。对 图 2 的 合 成 信 号 做 TT 变 换, 所 得 时 时 图 如 图 4 所 示。

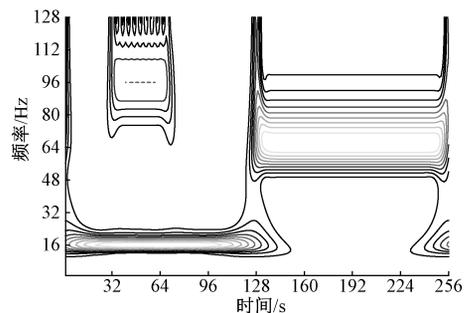


图 3 GST 时频特性

Fig. 3 GST time-frequency characteristics

由 图 4 可 以 看 出 TT 变 换 的 特 性, 信 号 在 对 角 单 元 以 及 附 近 位 置, 频 率 越 高, 聚 集 能 力 越 强, 且 分 布 的 范 围 越 窄。实 际 上, TT 变 换 对 角 线 位 置 高 频 信 号 就 是 行 波 波

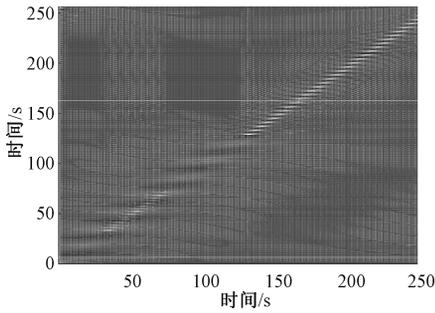


图 4 TT 变换时时特性

Fig. 4 TT transform time-time characteristics

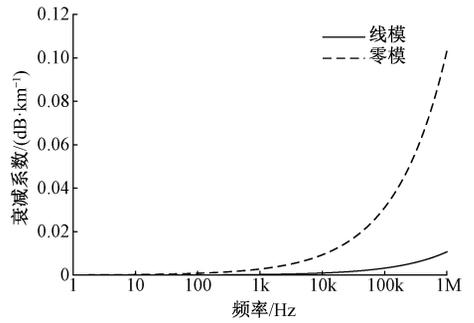


图 6 频率衰减系数随频率变化趋势

Fig. 6 Frequency attenuation coefficient changes with frequency

头,所对应时刻就是故障行波波头的时刻。

用 GST 选取适当频带,可以减小波速对故障测距的影响并滤除大量干扰信号,再利用 TT 变换对波头进行识别,由于 TT 变换的特性,可以压制所选频带中的较低频干扰信号,利于识别波头并捕捉高频信号突变时刻。因此,采用 GST-TT 变换的方法能够精确的标定故障行波波头到达测量端的时刻。

3 实验仿真与验证

3.1 基于 GST 的特征频带选取

故障行波在线路传输过程中必然会发生色散效应,频率不同的故障行波分量的衰减程度和相移大小各不相同,同时各个频率分量的衰减程度总是小于全频率信号的衰减程度。因此,需要提取适当频带进行分析,以进行行波测距。在本文认定波速恒定的情况下,故障特征频带的选取要遵循两个原则:一是确保所选择的特征频带范围内,波速变化的范围尽可能小;二是确保故障行波的波头能够有效识别并能够精确地对波头时刻进行标定。

图 5 和 6 所示分别给出了线模信号和零模信号的波速随频率变化的趋势以及线模信号和零模信号的频率衰减系数随频率变化的趋势。

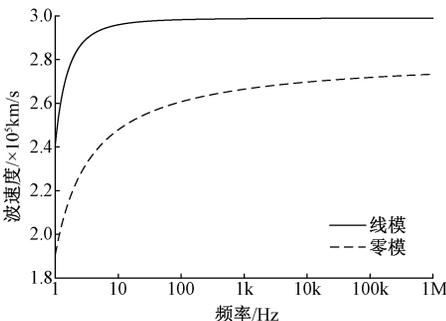


图 5 行波波速随频率变化趋势

Fig. 5 Trend of traveling wave's wave velocity with frequency

当频率在 1 kHz 以上时,线模信号波速趋于稳定状

态,但线模信号频率加剧衰减,因此,1 kHz 应是最佳频率点。但考虑到 TT 变换对波头到达时刻的标定精度取决于频率,且频率越高,波头紧支性越好,标定精度越高。当频率在 [20 60] kHz 范围,TT 变换对波头到达时刻的标定精度较高且线模信号频率衰减系数依旧处于较小范围内,根据香农定理,采样频率应该在 [80 120] kHz 范围,因此本文选取 100 kHz 作为采样频率。根据香农定理,把故障信号分解成为几个频带分量: d1 (25 ~ 50 kHz)、d2 (12.5 ~ 25 kHz)、d3 (6.25 ~ 12.5 kHz) 和 d4 (0 ~ 6.25 kHz)。d1 (25 ~ 50 kHz) 频带处于 [20 60] kHz 范围,所以选择 d1 (25 ~ 50 kHz) 频带作为故障特征频带。

假设在架空线路距离测量端 100 km 处发生单极接地故障,接地电阻为 1 Ω,发生故障的绝对时刻设定为 1.1 s。通过在 PSCAD 中仿真,测得测量端的电压信号如图 7 所示。

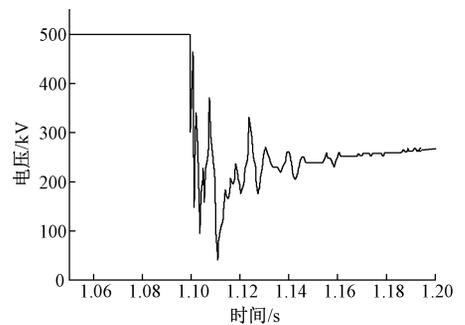


图 7 原始电压行波

Fig. 7 Original voltage traveling wave

原始电压信号经过解耦得到线模电压信号,对线模电压信号进行 GST 选取故障特征频带。将故障特征频带进行波形重构,如图 8 所示。

3.2 TT 变换标定行波波头到达时刻

TT 变换时时图的对角线及其附近高频信号聚集、低频信号分散,频率越高,幅值越大,因此可以利用 TT 变换捕捉信号的突变时刻并利用 TT 变换模极大值来标定波

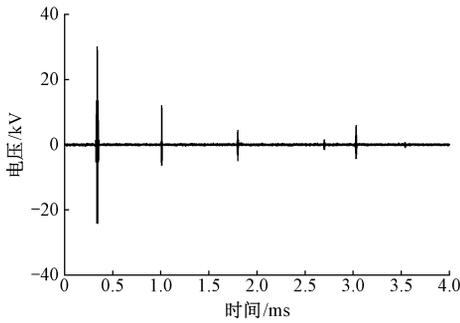


图 8 特征频带重构后的波形

Fig. 8 Waveform after reconstruction of the characteristic band

头对应的时刻。TT 变换具有极性,可以判断出波头的极性,即可以判断波头是否是对端母线反射行波波头。

将故障特征频带所对应的 TT 变换的对角线位置附近元素进行波形重构,根据极性分析出所需要的 3 个波头,用 TT 变换模极大值对波头到达时刻进行标定,如图 9 所示。

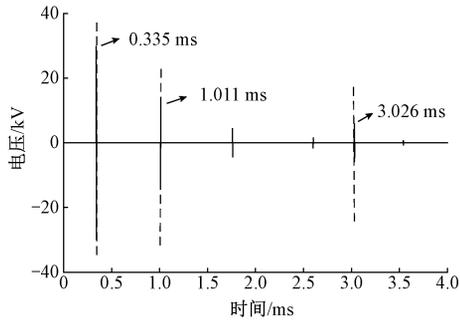


图 9 TT 变换对波头时刻的标定

Fig. 9 TT transform calibration of the wave head time

从图 9 可知, $t_1 = 0.335 \text{ ms}$, $t_2 = 1.011 \text{ ms}$, $t_3 = 3.026 \text{ ms}$,结合式(5)计算出故障距离为 100.386 km,误差为 0.386 km,精度较高。

3.3 基于 GST-TT 变换的单端测距仿真实验

为了验证基于 GST-TT 变换的单端故障行波测距方法的可行性,进行 PSCAD 仿真,设置噪声为 0 dB,故障距离分别为 100、200、300、400 km,单极接地故障的接地电阻分别为 1、10、100、200 Ω 。经过计算,所得测距结果如表 1 所示。

由表 1 可知,本文所提方法在无噪声干扰情况下,测距误差随着故障距离的增加而降低,具有较高的测距精度,从表中还能看出该方法具有较强的耐受过渡电阻能力。

3.4 抗噪性能检验

在实际工程中,采样时会采集到随机干扰噪声,而高斯白噪声是理想的加噪模型。因此,在仿真验证的采样

表 1 故障测距结果

Table 1 Fault location results

故障距离 d/km	过渡电阻/ Ω	测量距离 x/km	误差/ km
100	1	100.386	0.386
	10	100.386	0.386
	100	100.386	0.386
	200	100.386	0.386
200	1	200.474	0.474
	10	200.474	0.474
	100	200.474	0.474
300	200	200.474	0.474
	1	300.590	0.590
	10	300.590	0.590
400	100	300.590	0.590
	200	300.590	0.590
	1	400.705	0.705
	10	400.705	0.705
	100	400.705	0.705
	200	400.705	0.705

信号中分别加入 10 和 30 dB 的高斯白噪声,再次验证本方法的测距精度。设置过渡电阻为 100 Ω ,测距结果如表 2 所示。

表 2 加噪后故障测距结果

Table 2 Fault location results after noise

噪声/ dB	故障距离 d/km	测量距离 x/km	误差/ km
10	100	100.386	0.386
	200	200.474	0.474
	300	300.590	0.590
	400	400.763	0.763
30	100	100.416	0.416
	200	200.385	0.385
	300	300.737	0.737
	400	400.763	0.763

对比表 1 和 2 可以发现,本文所提方法拥有较强的抗噪能力,随着噪声的升高,测距精度会下降,但是在本文仿真前提下,依然具有较高测距精度。

4 不同方法对比分析

4.1 与传统行波法的对比

传统行波法故障测距应用广泛,但有一定的局限性。基于 GST-TT 变换的单端故障行波法不需要求出具体波速而且对波头时刻标定精度更高。采用三次 B 样条小波对故障行波波头到达时刻进行标定,故障行波波速取经验波 $v = 0.297 \times 10^9 \text{ m/s}$,设实测故障距离为 x ,根据传统单端行波法(式(17))进行计算。设置过渡电阻为 100 Ω ,测距结果如表 3 所示。

$$x = \frac{(t_2 - t_1)v}{2} \tag{17}$$

表3 传统行波故障测距结果

Table 3 Traditional traveling wave fault location results

过渡电阻/ Ω	故障距离 d/km	测量距离 x/km	误差/ km
100	100	100.535	0.535
	200	200.772	0.772
	300	301.603	1.603
	400	402.880	2.880

由表1和3可知,基于 GST-TT 变换的单端故障行波测距方法比传统行波法的测距精度有明显提升。

4.2 与 GST 标定波头到达时刻的对比

GST 也可以对行波波头进行标定,相对于小波变换对波头的标定精度更高。利用 GST 选取故障特征频带后,利用重构后的幅时曲线,应用模极大值原理直接对波头到达时刻进行标定,利用本文测距计算方法进行计算。设置过渡电阻为 100Ω ,用 GST 标定波头到达时刻方法的测距结果如表4所示。

表4 用 GST 识别波头故障测距结果

Table 4 Identifying wave head fault location results with GST

过渡电阻/ Ω	故障距离 d/km	测量距离 x/km	误差/ km
100	100	100.474	0.474
	200	200.562	0.562
	300	300.648	0.648
	400	400.822	0.822

由表1和4可知,基于 GST 对波头识别的测距方法精度相较于基于 TT 变换对波头识别的测距方法精度要低,体现出了 TT 变换对波头到达时刻的标定更为精准。

5 结论

本文提出了一种基于 GST-TT 变换的新型单端故障行波测距方法,利用 GST 优秀的时频分辨率提取故障行波特征频带,再利用 TT 变换对故障行波波头到达时刻进行精确的标定,结合不需要确定波速的计算方法,计算出故障距离。通过理论分析和仿真实验可以看出基于 GST-TT 变换的单端故障行波测距方法可以避免具体行波波速的计算,并降低了波速对故障测距的影响,同时 TT 变换能够有效识别波头,并能精确地捕捉波头突变时刻,测距精度较高且具有一定的耐受过渡电阻能力和抗噪能力。另外,本文所提方法也有局限性,首先,不能完全解决波速变化对故障测距的影响;再者,本文 GST 的调节因子的选取是人为选取的,具有主观性。因此,如何进一步降低波速变化对故障测距的影响以及如何优化 GST 的调节因子的选取是有待于改进的研究方向。

参考文献

- [1] 杨林,王宾,董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.
YANG L, WANG B, DONG X ZH. Summary of research on fault location of UHVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 185-191.
- [2] MAO W Q, YANG Q, ZHANG S, et al. Literature review of fault location research for HVDC transmission lines[C]. International Power, Electronics and Materials Engineering Conference (IPEMEC 2015), 2015: 357-360.
- [3] ALASSIA A, BAÑALESA S, ELLABBANA O, et al. HVDC transmission: technology review, market trends and future outlook [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 530-554.
- [4] 张悛宁,郝洪民,李京,等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.
ZHANG Y N, HAO H M, LI J, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [5] 杨亚超,黄纯,江亚群,等. MMC-HVDC 输电线路双端非同步故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 148-154.
YANG Y CH, HUANG CH, JIANG Y Q, et al. Double-ended asynchronous fault location method for MMC-HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 148-154.
- [6] 夏远洋,李啸骢,陈飞翔,等. 基于 FastICA 的输电线路行波故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 138-143.
XIA Y Y, LI X C, CHEN F X, et al. FastICA based traveling wave fault location algorithm for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 138-143.
- [7] 李振兴,王新,田斌,等. 基于沿线电压分布规律的快速故障测距[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 112-120.
LI ZH X, WANG X, TIAN B, et al. A fast fault location method based on distribution voltage regularities along transmission line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 112-120.
- [8] 张希鹏,邵能灵,郑晓东,等. 基于 WENTR 的柔性

- 直流输电线路故障测距[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 589-598.
- ZHANG X P, TAI N L, ZHENG X D, et al. Fault location in VSC-HVDC transmission lines based on WEMTR [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 589-598.
- [9] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
- GAO SH P, SUONAN J L, SONG G B, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [10] 洪翠, 付宇泽, 郭谋发, 等. 改进多分类支持向量机的配电网故障识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 7-15.
- HONG C, FU Y Z, GUO M F, et al. Identification method of distribution network faults based on improved multi-classification support vector machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 7-15.
- [11] MEYUR R, PAL D, SUNDARAVARADAN N A, et al. A wavelet-adaptive network based fuzzy inference system for location of faults in parallel transmission lines [C]. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016.
- [12] 徐耀松, 张原. 基于改进 VMD-MSE 方法的输电线路故障特征分析及分类[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 89-95.
- XU Y S, ZHANG Y. Feature analysis and classification of transmission line fault based on improving VMD-MSE methods [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 89-95.
- [13] WANG F R, ZHOU H. A new algorithm for two-terminal fault location based on distributed parameter line model [C]. International Conference on Education, Management, Commerce and Society (EMCS 2015), 2015: 368-374.
- [14] IDRIS M H, MUSTAFA M W, YATIM Y, et al. Effective two-terminal single line to ground fault location algorithm [C]. IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012), 2012: 246-251.
- [15] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 不依赖双侧时钟同步的输电线路双端行波测距[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 199-209.
- ZHANG G B, SHU H CH, YU J L, et al. Double-ended travelling wave fault location independent of two side time synchronization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 199-209.
- [16] SONG G B, CAI X L, GAO SH P, et al. Natural frequency based protection and fault location for VSC-HVDC transmission lines [C]. 2011 The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011: 177-182.
- [17] 于华楠, 马聪聪, 王鹤. 基于压缩感知估计行波自然频率的输电线路故障定位方法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 140-148.
- YU H N, MA C C, WANG H, et al. Transmission line fault location method based on compressed sensing estimation of traveling wave natural frequencies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 140-148.
- [18] 贾惠彬, 苏思岚, 李明舒, 等. 考虑线路参数频变特性的小波域行波信号奇异性增强方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 153-160.
- JIA H B, SU S L, LI M SH, et al. A singularity enhancement method in wavelet domain for traveling-wave with considering frequency characteristic of line parameter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 153-160.
- [19] 束洪春, 田鑫萃, 白冰, 等. 基于多测点的特高压长距离直流输电线路行波故障测距[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2105-2113.
- SHU H CH, TIAN X C, BAI B, et al. Fault location for gaveling wave based on multi measuring points for UHVDC long distance transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2105-2113.
- [20] 程星星. ± 500 kV 高压直接地极线路故障测距研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- CHENG X X. Research on fault location of ± 500 kV HVDC electrode line [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [21] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 142-148.
- LI Z Q, FAN Y F, HU J SH. Single terminal fault location method of HVDC transmission line immune to wave speed [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.
- [22] 罗继辉, 黄国勇. 基于广义 S 变换和深度置信网络的单向阀故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 192-198.
- LUO J H, HUANG G Y. Check valve fault diagnosis based on generalized S-transform and deep belief

network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 192-198.

作者简介



徐耀松, 2004 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2012 年于天津大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为智能测控系统设计。

E-mail: 38158183@qq.com

Xu Yaosong received his M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2004, Ph. D. degree from Tianjin University in 2012. Now he is an associate professor at

Liaoning Technical University. His main research interests include intelligent measurement and control system design.



徐才宝, 2017 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断。

E-mail: 798134242@qq.com

Xu Caibao received B. Sc. from Liaoning Technical University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interest includes power system fault diagnosis.